

Kartierung von Fluid-Austrittsstellen an Kontinentalrändern mit Fächerecholot und Seitensichtsonar

Wilhelm Weinrebe und Ingo Klaucke
Leibniz-Institut für Meereswissenschaften
IFM-GEOMAR
Wischhofstr. 1-3
24148 Kiel
wweinrebe@ifm-geomar.de, iklaucke@ifm-geomar.de

1 Hintergrund

Verglichen mit den Kontinenten ist der Boden der Ozeane geologisch jung, da er in einem ständigen Kreislauf von Entstehung aus flüssiger Magma, Transport an der Oberfläche der Erde, Alterung, Wiedereintauchen in das Innere der Erde und Aufschmelzung recycelt wird. An den mittelozeanischen Rücken entsteht neuer Meeresboden, durch Konvektionskräfte getrieben driften die entstandenen Lithosphärenplatten mit Geschwindigkeiten von einigen Zentimetern pro Jahr über die Oberfläche unseres Planeten. In den Subduktionszonen an den "aktiven" oder konvergenten Kontinentalrändern tauchen die Platten unter die Kontinente ab und werden in größere Tiefen transportiert, wo sie durch höheren Druck und steigende Temperaturen aufschmelzen und in eine neue Phase des Kreislaufes eintreten.

Während der Phase zwischen Entstehung und Subduktion kühlen die ozeanischen Platten ab, werden schwerer und Sedimente werden in zunehmendem Maße auf ihnen angelagert. Pelagische Sedimente enthalten viel organisches Material, durch Zersetzungsprozesse bilden sich Fluide und Gase in den Porenräumen. Während der Subduktion gelangen die Sedimente mit der abtauchenden Platte in größere Tiefen, wo die Fluide und Gase aufgrund höheren Drucks und höherer Temperatur aus den Porenräumen ausgepresst werden und in darüber liegende Gesteinsschichten aufsteigen (Abb. 1), zumindest ein Teil davon erreicht letztendlich den Meeresboden und tritt an Quellen oder Sickerstellen

aus. Die Aufstiegswege folgen vorhandenen Klüften, Brüchen oder Schwächezonen im Gestein, unter Umständen werden neue Wege geschaffen ("Hydrofracturing") (Ranero et al., 2008, Sahling et al., 2008).

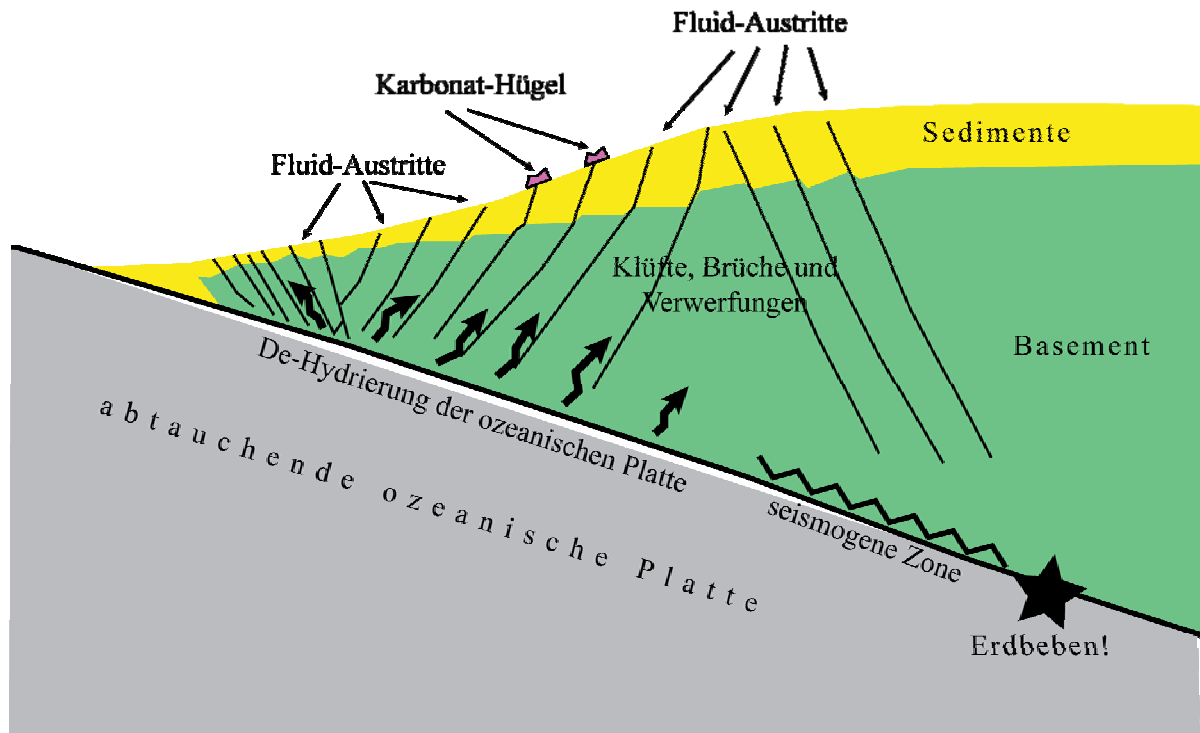


Abb. 1: Prinzip der Entwässerung der Sedimente der abtauchenden ozeanischen Platte bei der Subduktion.

Naturkatastrophen wie Erdbeben, Tsunamis, Vulkanausbrüche und submarine Hangrutschungen sind typische, ständige Begleiterscheinungen des Subduktionsprozesses. Dabei spielen die Fluide in den Sedimenten bei der Auslösung dieser Vorgänge eine entscheidende Rolle. Fluide in Sedimenten setzen deren Reibung herab; das Abtauchen der Platte wird erleichtert. Durch das Dehydrieren der Sedimentschichten in größeren Tiefen steigt die Reibung, Gesteinsschichten der abtauchenden ozeanischen und der darüber liegenden kontinentalen Platte verhaken sich, Spannungen werden durch das weitere Abtauchen aufgebaut, die letztendlich durch Erdbeben entladen werden. Die Menge der Fluide sowie der Dehydrierungsprozess kontrollieren so die Entstehung und Position der seismogenen Zonen. Menge und geochemische Zusammensetzung der Fluide beeinflussen auch das Aufschmelzen der abtauchenden Platte, die Ausbildung von Magmen und damit den Vulkanismus der Subduktionszone.

Um die Zusammenhänge im Innern der Subduktionszone zu verstehen, ist eine genaue Analyse der am Meeresboden austretenden Fluide sowie eine Bilanzierung und Quantifizierung notwendig, dies erfordert eine umfassende Kartierung der Meeresböden der Subduktionszonen.

Eine vollständige Kartierung von Fluid-Austrittsstellen am Boden der Ozeane ist allerdings äußerst schwierig, da deren Ausprägung sehr unterschiedlich sein kann. Die Bandbreite der Strukturen, an denen Fluide am Meeresboden ausfließen oder sickern, ist sehr groß. Durch die Vermischung mit Sedimenten können Schlammströme entstehen, die dann Schlammvulkane, -hügel oder -diapire bilden. Diese Strukturen können Dimensionen von einigen Zehner bis zu mehreren Hundert Meter erreichen. Solche Manifestationen von Fluid-Austritten können gut mit einem schiffsgebundenen Fächerecholot kartiert werden. An anderen Stellen dagegen vermischen sich die Fluide nicht mit festem Material, sondern fließen oder sickern einfach durch den Meeresboden. Solche Flecken sind im Allgemeinen relativ klein, oft nicht einmal durch Reliefunterschiede gegenüber dem umliegenden Meeresboden gekennzeichnet. Die Dimension kleiner Quellen oder Sickerstellen kann durchaus kleiner sein als ein "Footprint" des Fächerlotes. Um derartige Stellen zu kartieren ist also in der Regel der Einsatz tief-geschleppter Geräte notwendig. Die Interaktion der Fluide mit dem Seewasser sowie biogeochemische Prozesse führen zumeist zur Bildung von Karbonaten an den Austrittsstellen. Karbonate sind im Gegensatz zum umgebenden Meeresboden oft geprägt durch deutlich erhöhte Rückstreuereigenschaften, so dass diese Flecken sehr gut in den Echos eines tief-geschleppten Seitensichtsonars erkennbar sind. Erstaunlicherweise konnten diese Stellen aber auch in den "Backscatter"- und "Sidescan"-Signalen schiffsgebundener Fächerlote identifiziert werden.

2 Fallbeispiel 1: Fluid-Austrittsstellen am Kontinentalrand vor Zentral-Chile

Im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 574, der sich speziell mit der Rolle der Fluide in Subduktionszonen befasst, wurden in den Jahren 2006 und 2008 umfangreiche Kartierungen mit den Forschungsschiffen METEOR und JAMES

COOK am Kontinentalrand vor Zentral-Chile durchgeführt (Flüh and Bialas, 2008). Dabei wurden die schiffsgebundenen Fächerecholote Kongsberg Simrad EM120 sowie das tief-geschleppte Seitensichtsonar DTS-1 des IFM-GEOMAR eingesetzt. Chilenische Kollegen hatten hier bei einer früheren Ausfahrt Anzeichen für Fluid-Austritte gefunden: in seismischen Profile wurden Schlammvulkan-ähnliche Strukturen gesehen und in Schwerelot-Kernen wurden Gashydrate nachgewiesen. Die Untersuchungen konzentrierten sich auf einen Rücken in etwa 700 m Wassertiefe.

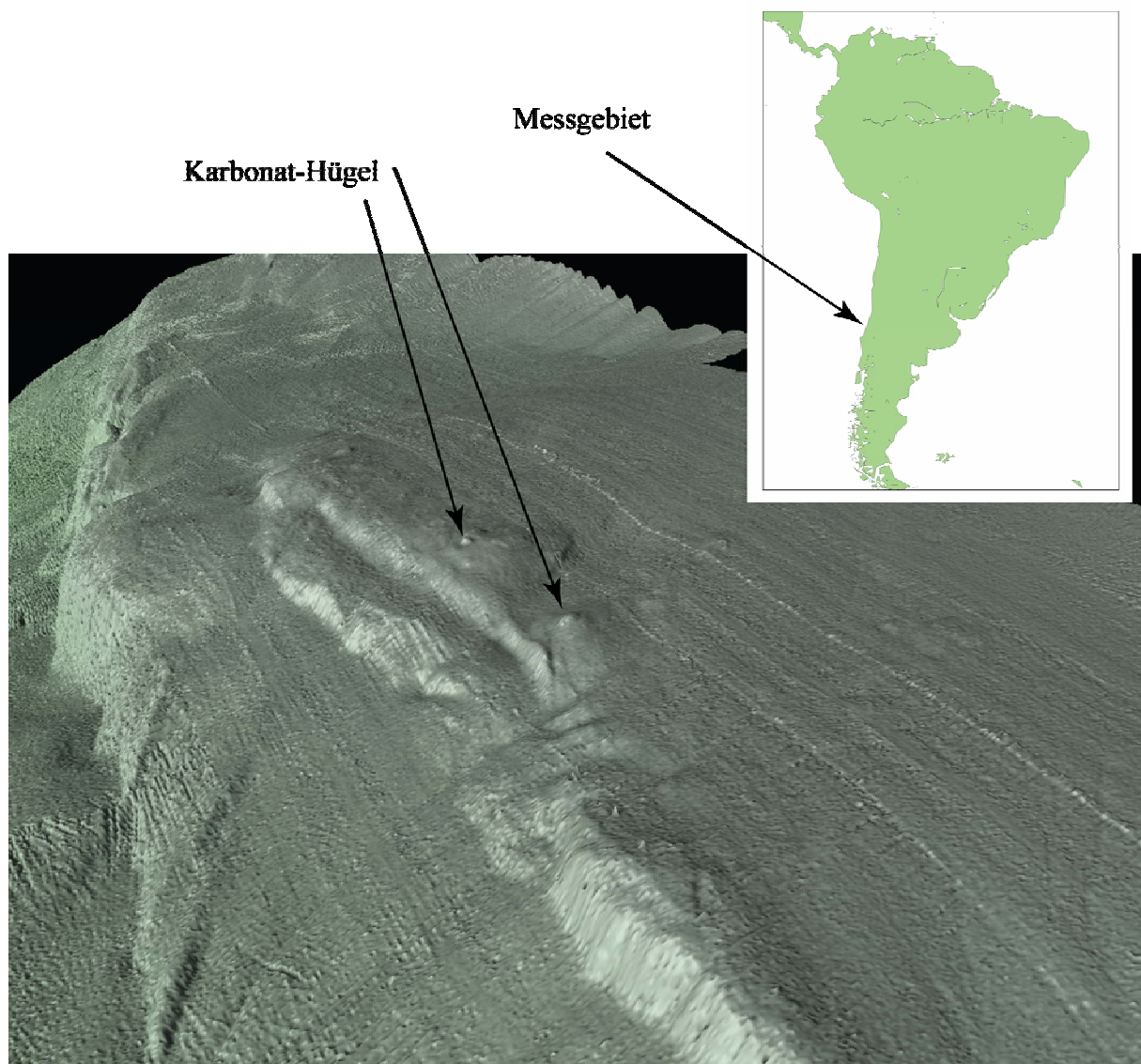


Abb. 2: Perspektiv-Ansicht der Bathymetrie eines Rückens am chilenischen Kontinentalrand, Wassertiefe ca. 700 m.

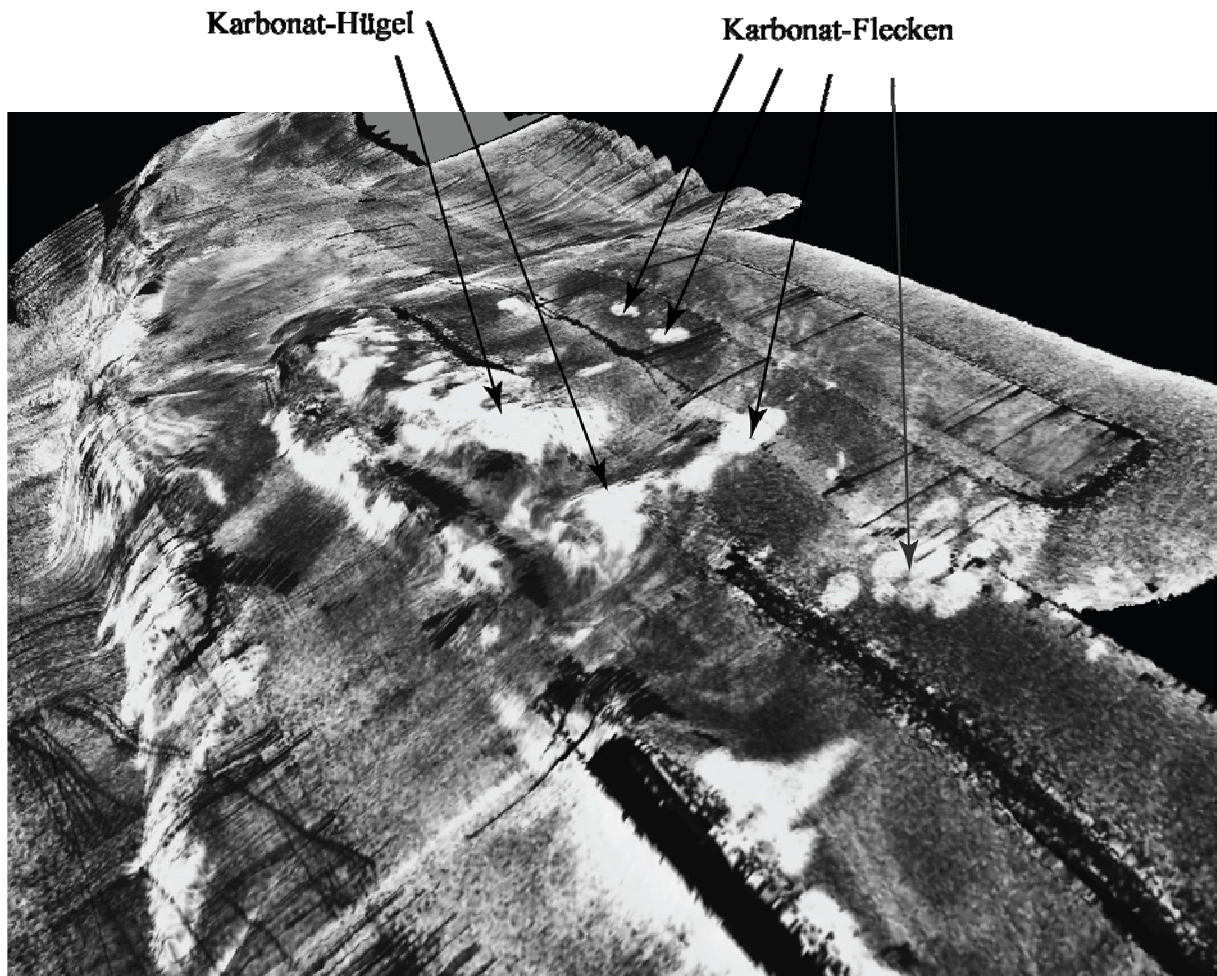


Abb. 3: Gleiche Perspektiv-Ansicht des Rückens am chilenischen Kontinentalrand wie in Abb. 2; Mosaik der Sidescan-Sonar-Daten des EM120 über die Bathymetrie gelegt (helle Färbung entspricht hoher Rückstreuung).

Um auch kleine Strukturen erkennen zu können, wurde aus den bathymetrischen Daten ein digitales Geländemodell (DGM) mit einer Zellenweite von nur 25 m gerechnet; einer Größe, in der Störungen und Fehler deutlich durchscheinen, aber auch morphologische Feinheiten zu erkennen sind (Abb. 2). Der überwiegende Teil dieses Rückens weist kaum Relief auf, nur zwei kleine Hügel mit einem Durchmesser von etwa 100 m und einer Höhe von nur 10 m sind auffällig. Überraschenderweise zeigt das Mosaik des Sidescan-Signals des EM120 dagegen viele Bereiche mit signifikant erhöhter Rückstreuung (weiße Flecken, Abb. 3), insbesondere auch an Stellen ohne nennenswertes Relief in der Bathymetrie. Auch die beiden Hügel (Abb. 2) sind durch deutlich erhöhte Rückstreuung gekennzeichnet. Die Abbildungen 2 und 3 zeigen das Gelände aus

exakt der gleichen Perspektive; ebenso die Abb. 4, in der das Mosaik der Sidescan-Aufnahme des tief-geschleppten Seitensichtsonars DTS-1 über die Bathymetrie gelegt worden ist.

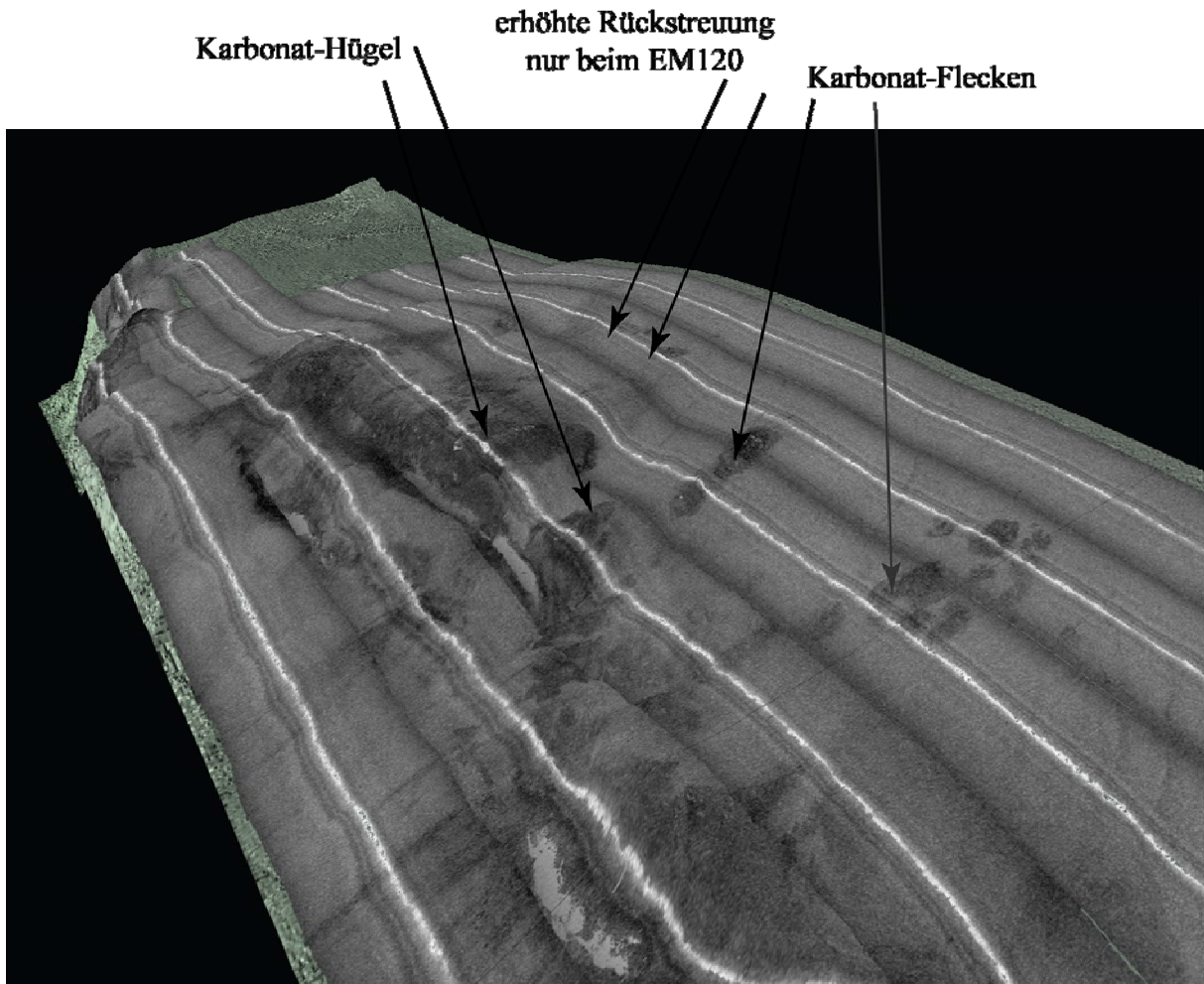


Abb. 4: Gleiche Perspektiv-Ansicht des Rückens am chilenischen Kontinentalrand wie in Abb. 2; Mosaik der Sidescan-Sonar-Daten des tief-geschleppten Seitensicht-Sonars DTS-1 über die Bathymetrie gelegt (dunkle Färbung entspricht hoher Rückstreuung).

Im Gegensatz zu Abb. 3 ist hier eine höhere Rückstreuung durch dunklere Grautöne gekennzeichnet. Das DTS-1 wurde hier mit einer Frequenz von 75 kHz betrieben und in einer Höhe von ca. 100 m über Grund geschleppt. Auch in diesen Daten sind die Bereiche erhöhter Rückstreuung deutlich erkennbar,

aufgrund der höheren Frequenz (75 kHz gegenüber 12 kHz beim EM120) und der erheblich geringeren Aufnahmeentfernung (ca. 100 m gegenüber ca. 700 m) mit markant höherer Auflösung; sogar Feinstrukturen innerhalb der Bereiche erhöhter Rückstreuung werden aufgelöst. Die Positionen stimmen sehr gut mit den Positionen der hellen Flecken in Abb. 3 überein; dies stützt die Interpretation dieser Bereiche als Gebiete mit Karbonaten am Meeresboden. Allerdings finden sich auch zwei Stellen, an denen nur die Daten des EM120 eine höhere Rückstreuung zeigen. Dies kann in der niedrigeren Frequenz des EM120 begründet sein: die in den Meeresboden eindringenden Signale werden an Karbonat-Strukturen zurück gestreut, die nicht bis an die Oberfläche reichen und deshalb von der höheren Frequenz des DTS-1 nicht erfasst werden.

3 Fallbeispiel 2: Fluid-Austrittsstellen am Kontinentalrand vor Neuseeland

Der Hikurangi-Kontinentalrand vor der Ostküste Neuseelands wurde auf der Fahrt 191 des Forschungsschiffes SONNE detailliert kartiert und untersucht (Bialas et al., 2007). Die bathymetrischen Daten der Vermessung mit dem Fächerecholot EM120 zeigen auch hier einen kleinen Rücken in etwa 1.100 m Tiefe, dessen Oberseite eben und nahezu strukturlos erscheint (Abb. 5). In den bearbeiteten Sidescan-Sonar-Daten des EM120 (Abb. 6) sind eine Reihe markanter Flecken mit signifikant erhöhter Rückstreuung auffällig: deutliche Anzeichen für Karbonat-Strukturen am Meeresboden. Zur Aufnahme der Feinstrukturen wurde wieder das tief-geschleppte Seitensichtsonar DTS-1 eingesetzt. Zur Verbesserung der Auflösung wurde das Gerät in einem Abstand von nur 20 m über dem Meeresboden geschleppt und der Abstand der Parallelprofile so eng gewählt, dass eine teilweise Überlappung der erfassten Meeresbodenbereiche erreicht wurde. Die Abb. 7 zeigt die aus den Sidescan-Sonar-Daten des DTS-1 errechneten Mosaik eines dieser Karbonat-Flecken aus Abb. 6, der auf vier Profilen aus unterschiedlicher Richtung und Ansicht aufgenommen wurde. Die Feinstrukturen der kleinen Karbonat-Ausfällungen sind sehr schön aufgelöst; interessanterweise zeigt diese Darstellung viele kleine, isolierte Hügel, während das EM120-Fächerecholot nur einen größeren Flecken mit erhöhter Rückstreuung liefert.

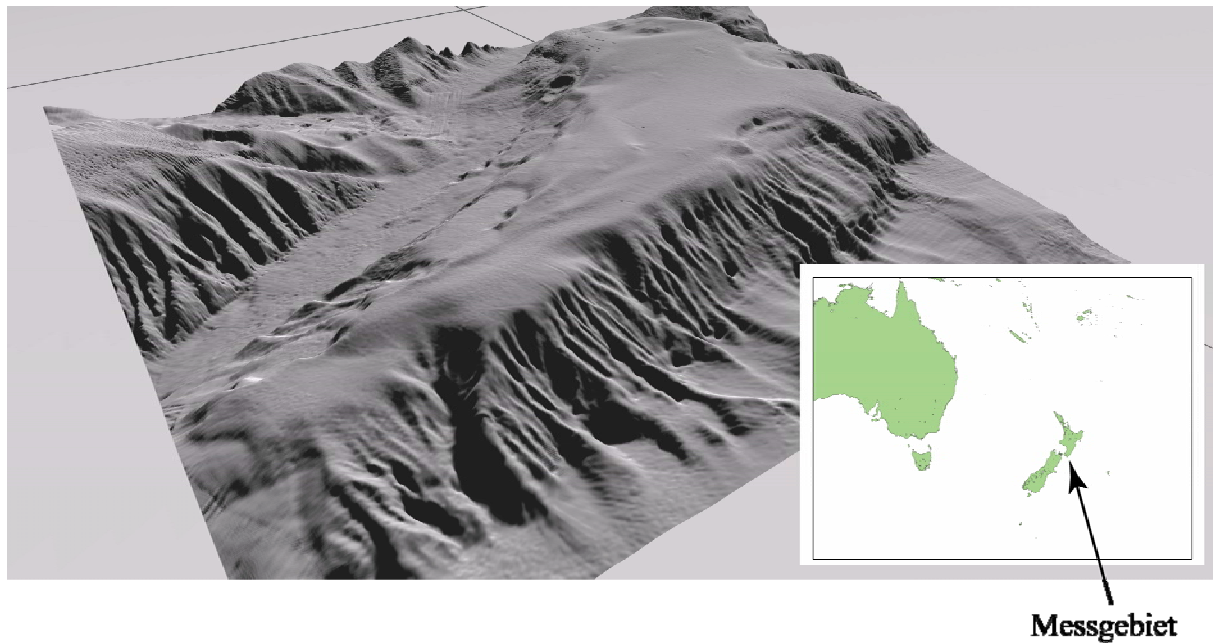


Abb. 5: Perspektiv-Ansicht der Bathymetrie eines Rückens am in der Wairarapa-Region, Neuseeland, Wassertiefe ca. 1.100 m.

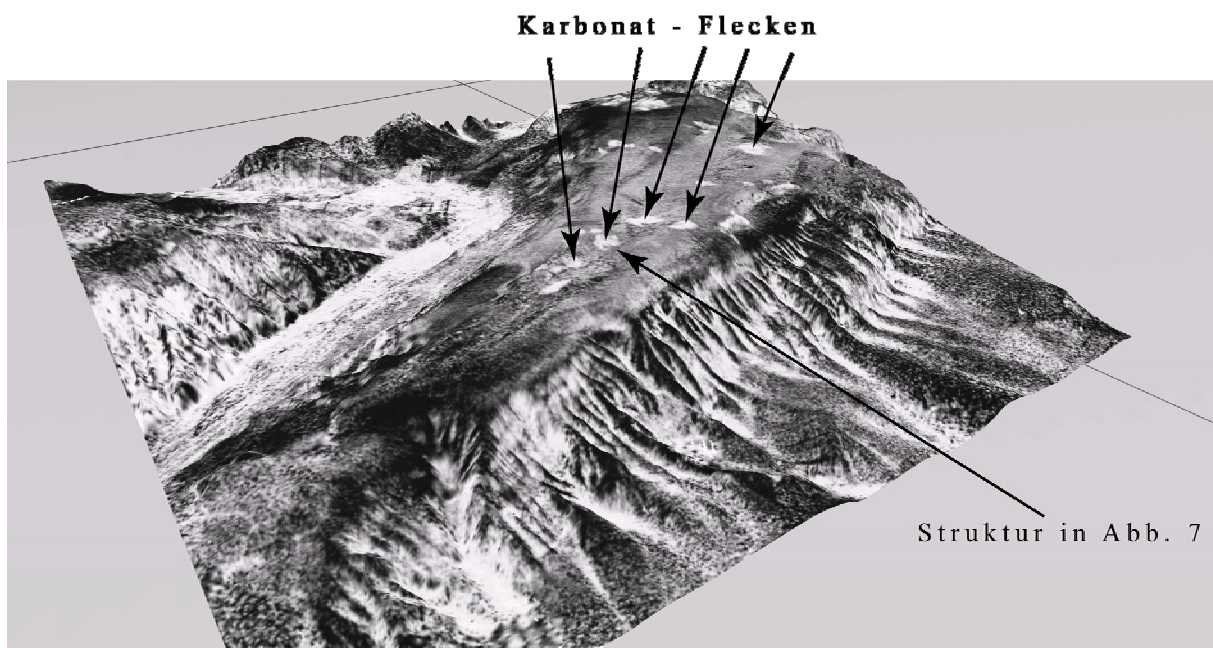


Abb. 6: Gleiche Perspektiv-Ansicht des Rückens wie in Abb. 5; Mosaik der Sidescan-Sonar-Daten des EM120 über die Bathymetrie gelegt (helle Färbung entspricht hoher Rückstreuung).

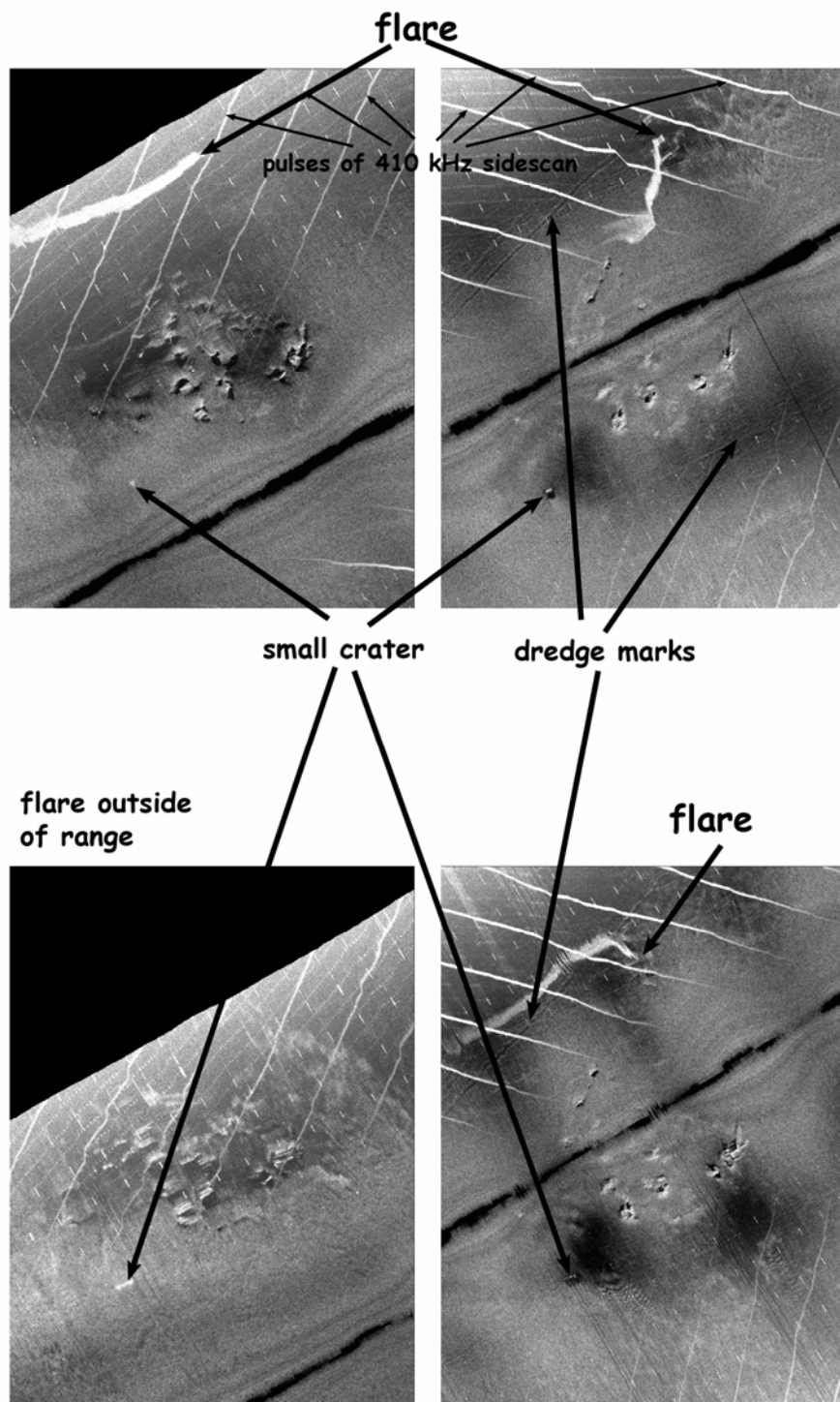


Abb. 7: Sidescan-Sonar-Mosaike von 4 Profilen mit dem DTS-1 über einer Struktur mit hoher Rückstreuung (vgl. Abb. 6) im zeitlichen Abstand von jeweils 2 Stunden aufgenommen.

Dies ist ein sicheres Anzeichen, dass der überwiegende Teil der Struktur dicht unter der Oberfläche ausgedehnt ist und nur in wenigen Punkten am Meeresboden aufscheint. Besonders bemerkenswert ist eine Fahne ("flare") am oberen Bildrand auf drei von vier Mosaiken, die stark unterschiedlich ausgebildet ist. Die vier Profile wurden im zeitlichen Abstand von ca. 2 Stunden aufgenommen, offenbar markiert diese Fahne aus dem Meeresboden austretende Gasblasen. Diese Sequenz dokumentiert die starke Dynamik der Fluid-Austritte an dieser Stelle (Klaucke et al., 2009).

4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die signifikante Rolle von Fluiden bei der Auslösung von Naturkatastrophen in Subduktionszonen wurde erst in den letzten Jahren erkannt. Inzwischen sind Austrittsstellen von Fluiden an vielen Kontinentalrändern weltweit dokumentiert worden. Die genaue Lokalisierung der Austritte ist die Voraussetzung für weitergehende Untersuchungen und Analysen der Fluide und für eine globale Quantifizierung. Die hydroakustische Kartierung der Fluid-Austrittsstellen ist allerdings eine Herausforderung, da sie oft sehr isoliert auftreten, in ihrer Größe stark variieren und oft keine nennenswerten Reliefunterschiede gegenüber dem umgebenden Meeresboden aufweisen. Die Dimensionen kleiner Sickerstellen sind oft von gleicher Größenordnung wie der "Footprint" eines einzelnen "Beams" des eingesetzten Fächerecholotes. Von Vorteil ist die starke Rückstreuung der Karbonate, die sich durch Fluid-Austritte bilden. Diese sind sehr gut mithilfe des "Backscatter"- oder des "Sidescan"-Signals des Fächerecholotes zu kartieren. Größere Auflösung bieten natürlich tief-geschleppte Geräte; in deren Aufnahmen kann auch die Feinstruktur der Karbonat-Bereiche aufgelöst werden. Vorteilhaft ist der kombinierte Einsatz von schiffsgebundenen und tief-geschleppten Geräten. Aufgrund der niedrigeren Frequenz dringt das Signal des Schiffs-Fächerecholotes einige Zentimeter in den Boden ein und erreicht Karbonat-Strukturen, die unter Sedimenten bedeckt sind.

Karbonat-Ausfällungen am Meeresboden sind sichere Anzeichen dafür, dass Fluide ausgetreten sind. Sie liefern keine Information, ob diese Austritte noch aktiv sind. Hierzu sind Systeme erforderlich, die aufsteigende Blasen oder Gasfahnen in der Wassersäule selbst detektieren können. Einzelstrahl-Verme-

sungslote oder Sediment-Echolote wurden hierzu bisher eingesetzt; diese Vermessungen sind jedoch für größere Gebiete nicht sehr effektiv. Große Fortschritte sind hier durch die Entwicklung und den Einsatz neuer Fächerecholote mit integriertem "Water Column Imaging" zu erwarten.

Literatur

- Bialas, J., Greinert, J., Linke, P. and Pfannkuche, O., Eds., 2007, FS SONNE Fahrtbericht / Cruise Report SO191 New Vents, IFM-GEOMAR Report 9, 186 pp.
- Flüh, E. R. and Bialas, J., Eds., 2008, RRS James Cook Fahrtbericht / Cruise Report JC23-1 & B, Chile-Margin-Survey, IFM-GEOMAR Report 20, 230 p.
- Klaucke, I., Weinrebe, W., Petersen, C. J. and Bowen, D., 2009, Temporal variability of gas seeps offshore New Zealand: Multi-frequency geoacoustic imaging of the Wairarapa area, Hikurangi margin, Marine Geology, in press.
- Ranero, C. R., Grevemeyer, I., Sahling, H., Barckhausen, U., Hensen, C., Wallmann, K., Weinrebe, W., Vanucchi, P., von Huene, R. and McIntosh, K., 2008, The hydrogeological system of erosional convergent margins and its influence on tectonics and interpolate seismogenesis, *Geochem. Geophys. Geosys.* 9, Q03S04, doi:10.1029/2007GC001679
- Sahling, H., Masson, D. G., Ranero, C. R., Hühnerbach, V., Weinrebe, W., Klaucke, I., Bürk, D., Brückmann, W. and Suess, E., 2008, Fluid seepage at the continental margin off Costa Rica and Nicaragua, *Geochem. Geophys. Geosys.* 9, Q05S05, doi:10.1029/2008GC001978